

수평형 집진기의 3차원 유동해석에 관한 연구

원종운, 김용일*
호원대학교 기계자동차공학과

A Study on Three-Dimensional Flow Analysis of Horizontal type Dust Collector

Jong-Wun Won, Yong-Il Kim*
Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Howon University

요약 본 연구에서는 대풍량 곡물건조기에 사용되는 수평형 집진기의 집진효율 향상과 최적화를 위한 연구의 선행과정으로 Computational Fluid Dynamics(CFD)를 이용하여 집진기 내부의 유동 특성 분석과 원뿔형 허브의 각 변화가 집진기의 집진성능에 미치는 영향을 해석하였다. 최근 집진기 입구에 원뿔형 허브와 고정 베인을 설치하여 선회유동(Swirl Flow)을 발생시켜 이물질과 공기를 분리시키는 수평형 사이클론 집진기(Horizontal type Cyclone Dust collector)가 개발되었다. 이 집진기는 크기가 비교적 작고 설치가 용이하고 비교적 배압이 낮아 추가 동력을 필요로 하지 않으며 베인의 선회력을 이용하기 때문에 대풍량 배수용 송풍기에도 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 수평형 집진기 형상으로 인해 발생하는 집진기 내부의 배압 문제와 분진 퇴적 문제를 해결하기 위해서 3차원 유동해석을 이용하여 집진기 내부 형상 변화에 따른 유동 특성에 관한 연구를 진행하였다. 실제 곡물건조기에 적용 가능한 수평형 집진기 설계를 위한 기초 자료를 제공하였으며, 향후 연구 예정인 고정 베인 설계, 주분리관 및 중간분리관의 설계에 적용하고자 한다.

Abstract A horizontal dust collector is used in a large wind-volume grain dryer. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to analyze the flow characteristics inside the dust collector, including the effects of wear on the conical hub on the dust collection performance. Recently, a horizontal cyclone dust collector was developed with a conical hub and fixed vanes at the inlet of the dust collector to generate swirl flow to separate foreign matter from the air. The dust collector is relatively small in size and easy to install, and it has a relatively low back pressure, which does not require any additional power. However, there are problems with a back pressure problem and dust deposition that are caused by the shape of the horizontal dust collector. To solve these problems, the flow characteristics were studied with internal shapes of the dust collector using three-dimensional flow analysis.

Keywords : Back Pressure, Computational Fluid Dynamics, Horizontal Type Dust Collector,
Three-Dimensional Flow, Grain Dryer

1. 서론

환경오염 중에서 대기 오염이 가장 심각한 문제로 대
호원대학교 학술연구비의 지원을 받았음.

두되고 있으며 대기 오염의 원인으로는 크게 사람의 생
활이나 활동에 의해 배출되는 인위적인 원인과 자연 발
생적인 황사나 화산 활동에 의한 분연, 사막의 모래먼지

*Corresponding Author : Yong-Il Kim(Howon Univ.)

email: kyi6909@naver.com

Received November 12, 2019

Accepted December 6, 2019

Revised December 4, 2019

Published December 31, 2019

등과 같은 자연적인 원인으로 나뉜다.

2012년 기준 우리나라의 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 이산화질소 등의 대기오염지수를 보면 미국, 영국, 프랑스, 일본보다도 훨씬 심각한 수치를 나타내고 있다[1]. 이러한 대기오염의 주원인으로는 중국 등에서 넘어오는 황사, 미세먼지와 같은 국외의 영향과 국내의 발전소 등에서 석유, 석탄과 같은 화석연료의 연소나 자동차 매연으로 인하여 배출되는 입자상 물질이 발생원인으로 알려져 있다.

대기오염의 원인은 이외에도 관심도가 적지만 농업분야에서도 존재한다. 의학전문지 The Lancet에 의하면 2015년 한 해 동안 한국에서 조기사망의 원인 중에 초미세먼지(PM_{2.5})에 의해 발생한 조기사망의 28.6%가 농업 때문이라고 발표하였으며[2], 또 다른 연구에서는 가축의 사료로 사용되는 곡물분진이 직업성 천식의 발병 원인이 된다고 하였다[3]. 이와 같이 농업분야에서 발생하는 대기오염의 문제가 날로 심각하여 지고 있으며, 더욱 엄격해져 가는 대기오염물질 배출규제에 대한 대처가 필요하다.

이러한 상황에서 곡물 건조 시 발생하는 곡물분진은 2015년 한 해 동안 생산된 약 6,500,000 톤의 벼와 보리의 건조 시 발생하는 곡물분진은 약 20,000 여 톤에 달하며, 이 분진은 곡물을 건조하고 남은 곡물껍질과 곡물과 함께 섞인 먼지나 기타 이물질들이며, 대부분의 농업 현장에서 곡물 건조 시 발생하는 분진에 의한 오염을 방지하거나 자체적으로 제작한 집진기를 사용했으나 그 효과는 미비하였다[4]. 하지만 분진에 의한 오염으로 피해가 확산되면서 이를 해결하기 위해 농촌 현장에 맞는 집진 장치 필요하다.

수평형 집진기는 곡물 건조기 출구측에 설치되어 배수 배풍기에서 배출되는 습한 공기를 고정 베인(vanes)에 유입되도록 입구에 확산 원뿔형 허브(hub)가 있으며 다수의 고정 베인을 통과 한 후 유동장의 재순환 영역을 제어하여 선회력을 높이기 위한 중간 분리관과 집진기 배출구로의 주 유동 배출을 위한 주 분리관, 선회 유동에 혼입되어 있는 미세 먼지를 분리하여 배출하는 분진배출구로 구성되어 있다.

따라서 본 연구에서는 대풍량 곡물건조기에 사용되는 곡물건조기의 집진효율 향상과 최적화를 위한 선행 연구로 Computational Fluid Dynamics(CFD)를 이용하여 집진기 내부의 유동 특성 분석과 원뿔형 허브의 각 변화가 집진기의 집진성능에 미치는 영향을 파악하여 앞으로의 연구에서 고정 베인 설계 및 주분리관, 중간분리관의 설계에 적용하고자 한다.

2. 사이클론 집진기

2.1 사이클론 집진기

원심력을 이용하여 유체로부터 분진 입자를 분리하는 장치를 사이클론(cyclone)집진기라고 한다. 그중 기체사이클론은 원통형 장치내에 분진을 함유하는 기체를 장치 내벽에 접선방향으로 유입시켜 함진가스에 선회운동을 부여함으로써 분진입자에 작용하는 원심력과 관성력을 이용하여 가스중의 입자를 분리 포집하는 집진장치이다.

사이클론 집진기는 구조에 따라 크게 접선 유입식(involute)사이클론과 축류식(axial-vane) 사이클론 두 가지로 나뉜다. 접선 유입식은 표준사이클론이라 불리어지며 분진을 함유한 가스유입관이 사이클론 내벽에 접선방향으로 연결되어 있고 접선속도로 유입된 기류가 원주방향의 운동을 하게 되어 원심력에 의해 분진은 집진기 벽면으로 움직여 벽에 충돌하게 되고 중력방향으로 떨어지게 되어 집진되며, 분진과 분리된 가스는 집진기 상부의 출구를 통해 배출되게 된다. 축류식 집진기는 분진을 함유한 가스가 축방향에서 유입되어 고정 가이드 베인(Guide vane)을 통과하면서 선회력에 의해 분진과 가스가 분리된다. 집진기 입구에서 선회류로 바뀐 분진과 가스는 원심력에 의하여 원통 벽을 따라 선회하면서 이동하여 원통 벽에 설치된 분진배출구를 통하여 배출된다. 분진이 제거된 가스는 집진장치의 축방향을 따라 배출구를 통하여 집진장치 외부로 배출된다[5].

2.2 수평형집진기

사이클론 집진기(Cyclone Dust Collector)는 구조가 간단하고 높은 압력과 온도에서도 취급이 용이하며 유지 보수 비용이 저렴하여 많은 산업 분야에서 선호되어져 왔다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 사이클론 집진기를 농업 현장에 바로 적용하는 것은 어려움이 있었다. 그 이유는 최근 곡물 건조기는 곡물의 우수한 품질을 우선시 하여 저온 대풍량방식을 선호하고 있으며 배수용 송풍기 역시 대형화 하고 있는 추세이다. 배수용 송풍기의 대풍량 대형화로 직경이 커지면서 설계상 사이클론 집진기 역시 대형화 될 수밖에 없게 되는데 이러한 것은 설치공간의 제약을 가져오며 집진 효율(Collection Efficiency)을 감소시키는 원인이 되고 있다. 이러한 이유로 최근 집진기 입구에 원뿔형 허브와 고정 베인을 설치하여 선회유동(Swirl Flow)을 발생시켜 이물질을 공기와 분리시키는 수평형 사이클론 집진기(Horizontal type Cyclone

Dust collector)가 개발되었다[6]. 이 집진기는 크기가 비교적 작고 설치가 용이하고 비교적 배압이 낮아 추가 동력을 필요로 하지 않으며 배인의 선회력을 이용하기 때문에 대풍량 배습용 송풍기에도 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나 배습용 송풍기에서 배출되는 이물질이 혼입된 공기는 이물질 분리를 위하여 집진기 내부를 통과하면서 에너지가 감소하고 배풍저항을 받게 되는데 이는 곡물건조기에 배압으로 작용해 곡물건조기의 건조성능을 감소시키는 악영향을 주게 된다. 또한 수평형 집진기의 구조상 기존의 사이클론 집진기와는 달리 재순환 영역이 존재하여 포집되거나 배출되지 않은 분진과 이물질이 집진기 내부에서 표류하여 쌓이게 된다[7][8].

이와 같은 단점에도 불구하고 이를 개선하여 농업 현장에 수평형 집진기를 적용시키고자 하지만 기존의 사이클론 집진기에 비교하여 수평형 집진기 관련 연구는 전무한 실정이다.

3. 실험 및 해석 방법

3.1 해석 대상 및 경계조건

본 연구에서는 수평형 집진기 형상으로 인해 발생하는 집진기 내부의 배압 문제와 분진 퇴적 문제를 해결하기 위해서 3차원 유동해석을 이용하여 집진기 내부 형상 변화에 따른 유동 특성에 관한 연구를 진행하였다. 수평형 집진기는 곡물 건조기 출구에 설치되며 Fig. 1은 본 연구에 사용한 수평형 집진기의 개략적인 형상을 나타내었다. 곡물 건조기의 배풍기에서 배출되는 공기를 고정 가이드 베인에 유입되도록 입구에 확산 원뿔형 허브(Conical hub)가 있으며 다수의 고정 베인을 통과한 후 유동장의 재순환 영역을 제어하여 선회력을 높이기 위한 중간 분리관(Intermediate separator)과 집진기 배출구(Air outlet)로의 주 유동 배출을 위한 주 분리관(Main separator), 선회 유동에 혼입되어 있는 미세 먼지를 포집하기 위한 포집구(Dust collector)로 구성되어 있다.

수평형 집진기 내부의 유동 특성 분석과 원뿔형 허브의 각 변화가 집진성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 수치해석을 진행했다. 원뿔형 허브의 각은 각각 45°, 60°, 90°, 120°의 조건으로 해석을 진행했다. 수치최적설계(numerical optimization)방법에 의하여 얻어진 최적설계의 결과로 고정 가이드 베인의 각은 45°, 베인의 개수는 10개의 조건으로 해석을 했다.

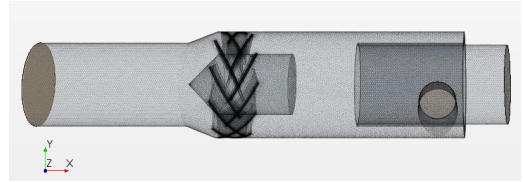


Fig. 1. Schematic diagram of horizontal cyclone dust collector

본 연구에서는 수치해석을 위해 상용 프로그램인 STAR-CCM+를 사용하여 3차원 전산유동해석을 수행하였으며, 사이클론 내에서 정상상태, 작동유체는 표준상태의 비압축성 유체인 공기로 가정하였으며, 3차원 난류 유동을 지배하는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)방정식을 적용하였으며, 수치해석에 사용한 3D 메쉬는 정렬 격자와 비정렬 격자를 혼합하여 사용하였으며 수렴성을 테스트하기 위해서 약 100만개의 격자부터 1,000만개의 격자까지 수치해석을 진행하였으며, 약 600만개의 격자를 사용했을 때부터는 수렴성이 가장 좋았으며 그 이상부터는 격자에 따른 수렴성 차이를 보이지 않았다. 따라서 본 연구에서는 약 600만개의 격자를 사용하였다. 수치해석의 수렴성은 잔차(Residual)값으로 판단하는데 1×10^{-4} 값을 기준으로 하였다.

난류 모델은 k-Epsilon turbulence 모델을 사용했다. 난류 해석에 있어서 일반적으로 사용되어지는 k-Epsilon standard 모델은 강한 스웰을 일으키는 유동 해석에서는 접선 방향 속도를 제대로 구현해 내지 못한다. 따라서 강한 스웰 유동 해석에 있어서 많은 선행 연구들은 난류모델로 Realizable 모델, k-Epsilon RNG 모델, RSM(Reynolds stress model) 모델 등을 사용해왔다. 본 연구에서는 스웰 유동내부의 재순환영역과 역압력 구배에서의 경계층, 박리 유동 등에서 더 좋은 결과를 보여주는 Realizable k-Epsilon Two-layer 모델을 사용했다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 상용프로그램으로 수평형 집진장치에 관한 3차원 유동해석을 진행하였다. Fig. 2는 수치해석을 통해 집진기의 원뿔형 허브 각(45°, 60°, 90°, 120°)에 따른 압력 분포를 contour로 나타낸 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이, 허브 각이 커짐에 따라 압력의 크기도 커지는 것을 볼 수 있다. 허브의 각이 45°에서 60°로 커질

때 압력 분포의 변화가 커지며 60°에서 120°로 커질 때는 압력 분포의 변화가 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 집진기 입구 부분에서 그 변화는 더욱 두드러진다. 이는 원뿔형 허브의 단면적이 커짐과 동시에 유동 단면적이 작아져 허브에 의한 후류 발생과 유로에 의한 유동저항에 의한 것으로 보인다.

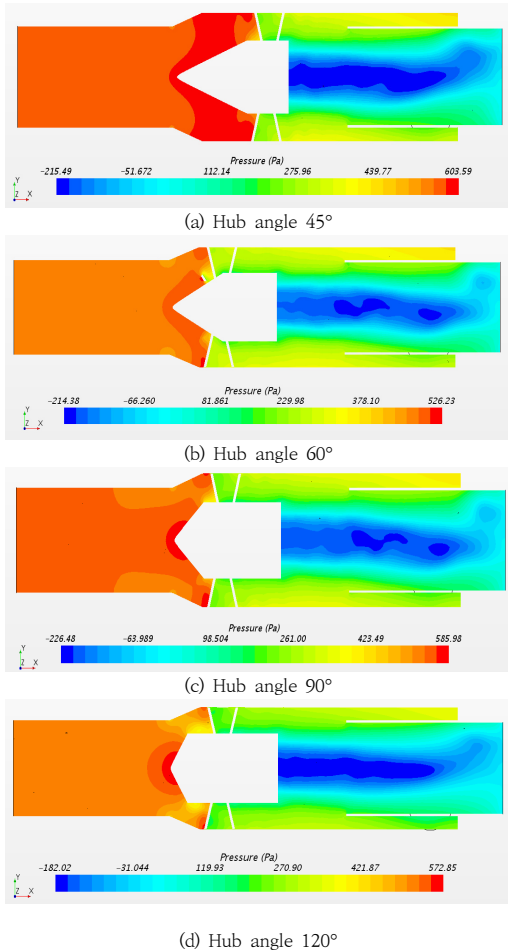


Fig. 2. Contour variations of pressure with conical hub angle

Fig. 3은 원뿔형 허브 각에 따른 집진기 입구에서의 압력 분포를 나타내며, x축은 집진기 입구의 반경으로 측정위치를 나눈 값이며, y축은 집진기 입구에서의 압력의 크기를 최대 압력으로 나누어 무차원 수로 나타낸 것이다. 압력의 변화폭이 가장 큰 것은 가장자리 부분이며 허브 각이 작아질수록 위치에 따른 압력값의 변화가 적어지는 것을 알 수 있다.

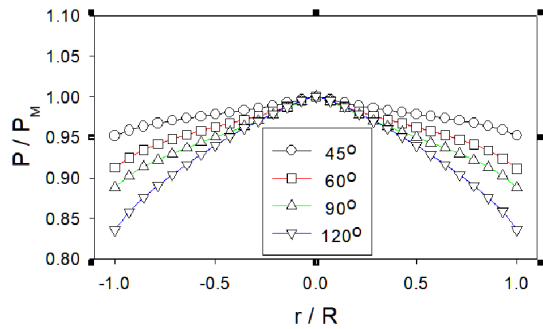
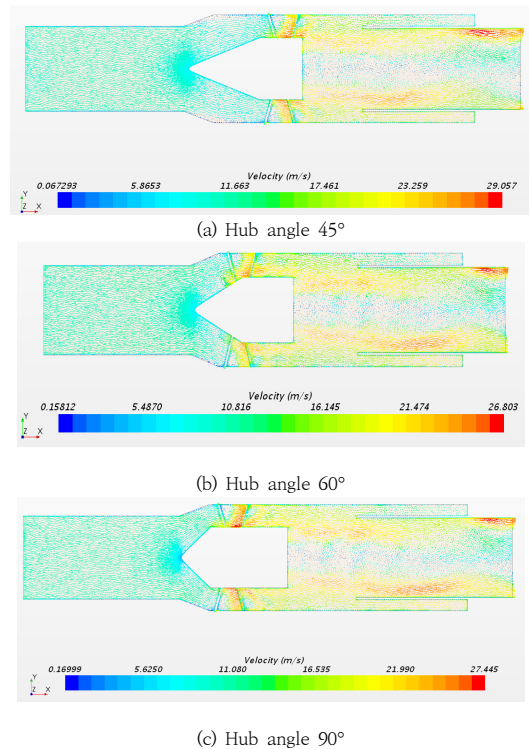
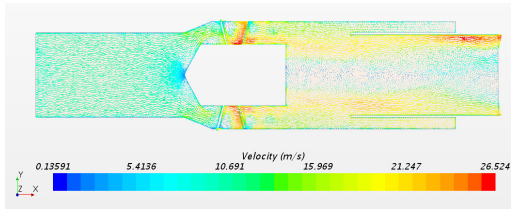


Fig. 3. Distributions of pressure with conical hub angle

Fig. 4는 수평형 집진기의 원뿔형 허브 각(45°, 60°, 90°, 120°)에 따른 속도 분포를 Contour로 나타낸 것이다. 결과를 보면 허브 각이 커짐에 따라 속도의 크기 역시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 유로 단면적이 작아지면서 속도의 크기는 증가하는 것으로 볼 수 있다. 또 각이 커질수록 중간 분리관의 면적이 커지면서 중간 분리관에 의해 생성되는 후류에 영향이 증가한 것으로도 사료된다.



(c) Hub angle 90°



(d) Hub angle 120°

Fig. 4. Contour variations of Velocity with conical hub angle

Fig. 5는 주 분리관 앞에서 원뿔형 허브 각의 변화에 따른 속도분포를 수직 단면으로 잘라 나타낸 것이다. y축은 측정위치 속도를 최대속도로 나눈 무차원 값이며, x축은 집진기 입구의 반경으로 측정위치를 나눈 값이다. 수직 단면을 보면 주 분리관에 의한 속도 변동 보이며, 하부측이 상부측보다 속도 변화가 더 큰 것을 볼 수 있으며 이는 포집구 위치가 유동 패턴에 영향을 미치는 것으로 보인다.

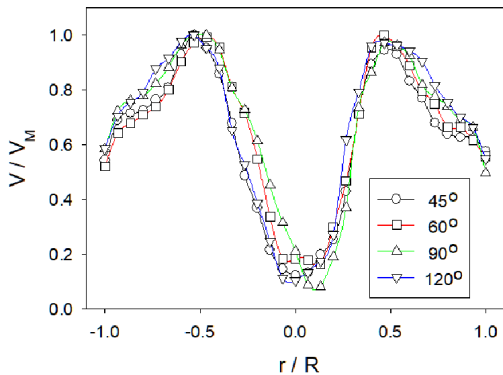


Fig. 5. Distributions of velocity with conical hub angle

Fig. 6은 원뿔형 허브 각에 따른 압력 및 속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 x축은 원뿔형 허브 각이고 y축의 좌, 우는 각각 압력, 속도를 나타낸 것이다. 압력분포는 수평형 집진기의 배압 문제를 해결하기 위한 중요한 지표다. 속도분포는 집진효율에 있어서 가장 중요한 선회력에 관련이 있다. 그림을 보면 속도는 원뿔형 허브 각이 45°에서 60°까지 커질 때 7m/s 정도 감소하지만 60°에서 90°로 증가하면서 속도가 증가함을 보여준다. 그러나 압력은 45°에서 60°로 원뿔형 허브 각이 변화할 때 약 19%정도 감소하지만 60°에서 90°로 커지면서 약 5%정도로 감소한다. 따라서 배압과 집진효율 모두 고려했을

때 압력의 감소율이 적어지고, 속도가 증가하는 최적의 원뿔형 허브의 작은 기본 값인 90°이다. 원뿔형 허브 각이 90°보다 작아지면 배압이 증가하여 동력이 많이 들며, 90°보다 커지면 속도가 감소하여 집진효율에 가장 중요한 선회력이 작아져 집진효율이 떨어진다.

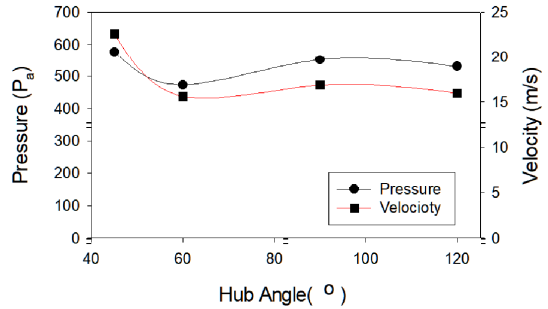


Fig. 6. Comparison of pressure, velocity with conical hub angle

Fig. 7은 최적의 원뿔형 허브의 각인 90°에서 수평형 사이클론 집진기 내부에서 집진이 진행되는 동안 분진은 원뿔형 허브와 고정 베인을 통과한 후 나선형으로 회전하면서 기체와 분리되어 포집구로 들어가서 집진되는 스트림 라인으로 나타낸 것이다.

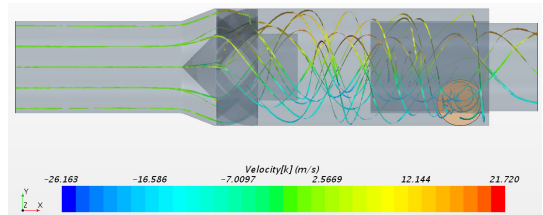


Fig. 7. Display the streamlines inside the cyclone separator.

5. 결론

본 연구에서는 대용량 곡물건조기에 사용되는 수평형 집진기의 집진효율 향상과 최적화를 위한 선행 연구로 Computational Fluid Dynamics(CFD)를 이용하여 집진기 내부의 유동 특성 분석과 원뿔형 허브의 각 변화가 집진기의 집진성능에 미치는 영향을 해석하였다.

원뿔형 허브 각이 45°에서 60°까지 커질 때 속도는 7m/s 정도 감소하지만 60°에서 90°로 증가하면서 속도가 증가함을 보여준다. 그러나 압력은 45°에서 60°로 원

뿔형 허브 각이 변화할 때 약 19%정도 감소하지만 60°에서 90°로 커지면서 약 5%정도로 감소한다. 따라서 배압과 집진효율 모두 고려했을 때 압력의 감소율이 적어지고, 속도가 증가하는 최적의 뿔형 허브의 각은 90°임을 확인할 수 있었다.

또한 수평형 집진기의 형상변화에 따른 집진성능변화를 해석하였으며, 실제 곡물건조기에 적용 가능한 수평형 집진기 설계를 위한 기초 자료를 제공하였으며, 향후 연구 예정인 고정 베인 설계, 주분리관 및 중간분리관의 설계에 적용하고자 한다.

References

- [1] Notice of People's Republic of China (GB3095, 2012, No.7)
- [2] Nick Wats et al., "The Lancet Countdown on health and climate change : from 25 years of inaction to a global transformation for public health", The Lancet, 2017
- [3] Hae Sim Park."Grain dust-induced occupational asthma"The Korean Academy of Asthma, Allergy and Clinical Immunology.v.16, no.4, pp. 537-547, 1996
- [4] K. Darcovich, et al. "Developments in the control of fine particulate air emissions", Adv. Powder Technology, 8(3) ; pp.179-215, 1997
- [5] Hong, Sung-Gil. et al,"A Numerical Study on an Optimum Design of a Hybrid Collector Coupled with the Principle of Cyclone, Baffle and Bag-Filter", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society / v.14, no.2.2013, pp.983-989
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.2.983>
- [6] J. M. Beeckmans, "The Effect of Particulate Solids on Pressure Drop Across a Cyclone", Powder Technology, 52 ; 227, 1987
- [7] Pyeong gwon Moon. "Study on the Flow Characteristics of Horizontal Type Dust Collector for Grain Dryer Using Numerical Analysis", Master's thesis. Chonbuk National University.2018
- [8] Kang, Soon-Kook. "A Study for Collection and Mixing Characteristics of Particles in a Modified Cyclone Particle Collector", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. V.14. pp.485-492
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.1.485>

원 종 운(Joung-Wun Won)

[정회원]



- 2014년 2월 : 서남대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 호원대학교 기계자동차공학과

<관심분야>

신재생에너지, 자동차튜닝공학

김 용 일(Yong-Il Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 전북대학교 기계공학과
- 2003년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 기계자동차공학과

<관심분야>

열유체공학, 신재생에너지, 청정기술